文章编号:1005-0523(2022)05-0070-08

基于环境成本的公铁货物运输方式选择研究

叶玉玲[1,2,3],刘 楷[4],刘佳林[5]

(1. 同济大学交通运输工程学院,上海 201804; 2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804;
3. 上海市铁路智能调度指挥系统工程研究中心,上海 200071;4. 中铁上海设计院集团有限公司,上海 200070;
5. 上海市隧道工程轨道交通设计研究院,上海 200235)

摘要:交通运输业是目前主要的污染排放源之一,鉴于铁路运输在绿色环保方面的优势,引导货流从公路转向铁路已经成为降低货运行业环境污染的重要举措。研究了公路与铁路竞争条件下考虑环境成本的货物运输方式选择问题,量化分析了环境成本对货物运输方式选择的影响。首先利用各类污染物排放量与成本因子测算单位环境成本,并采用Logit模型对货物单位时间价值进行标定。基于此,综合考虑运输成本、时间成本和环境成本,以最小化社会总成本为目标构建了公铁运输网络间货物运输方式选择模型。以山东省公路网和铁路网货运数据进行了实例研究,分析了环境成本系数变化对运输方式选择和路径决策的影响。结果表明,考虑环境成本后,铁路货运市场份额将会提高,运输成本和污染物排放量则有所降低。

关键词:货运分担率;路径选择;环境成本;单位时间价值;污染物排放量

中图分类号:U294.1 **文献标志码**:A

本文引用格式:叶玉玲,刘楷,刘佳林. 基于环境成本的公铁货物运输方式选择研究[J]. 华东交通大学学报,2022,39(5):70-77.

Study on the Modal Choice of Road and Railway Freight Transportation Based on Environmental Cost

Ye Yuling[1,2,3], Liu Kai[4], Liu Jialin[5]

(1. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Shanghai Railway Intelligent Dispatch Command System Engineering Research Center, Shanghai 200071, China; 4. China Railway Shanghai Design Institute Group Co., Ltd., Shanghai 200070, China; 5. Shanghai Tunnel Engineering & Rail Transit Design and Research Institute, Shanghai 200235, China)

Abstract: Transportation industry is one of the main sources of pollution emission at present. To reduce environmental pollution in freight industry, it has become an important measure to guide freight flow from road transportation to rail transportation in view of the advantages of railway transportation in environmental protection. Therefore, this paper studies the choice of freight transport mode considering environmental cost under the competition between road transportation and rail transportation, where the environmental influence on share rate is quantified. The unit environmental cost is calculated by various pollutants emissions and cost factors and the unit time value of goods is calibrated through the Logit model. Aiming at the minimization of the total social cost composed of transportation cost, time cost and environmental cost, a choice model for freight transportation is then formulated. Taking the freight data of road network and railway network in Shandong as an example, the transportation mode and route selection schemes are discussed under different values of environmental cost coefficient. It is found that considering the environmental cost, the freight market share of railway transportation will

收稿日期:2021-11-17
基金项目:中国铁路总公司科技研究开发计划课题项目(P2018X010);上海市自然科学基金项目(22ZR1465800)

increase, and transportation cost and pollutant emission will decrease correspondingly.

Key words: share rate of freight transport; route selection; environmental cost; unit time value; pollutant discharge level

Citation format: YE Y L, LIU K, LIU J L. Study on the modal choice of road and railway freight transportation based on environmental cost[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(5): 70–77.

“公转铁”实际上是运输结构的调整，最终表现为运输市场上公路与铁路运输方式的货运份额变化。在运输方式选择行为方面，货主总是选择效用最大的运输方式[1-2]，将运输费用、时间、可靠性、准时性、安全性和便捷性[3-4]作为货物运输方式选择的效用集，并对这些定性属性进行定量化处理[5-6]。然而这些模型缺乏对路段容量限制、运到时限等约束的考虑，同时在货物单位时间价值的取值上较为随意，与实际情况差距较大。

还有部分学者将不同运输方式组合为综合运输网络进行货流分配，即从整个运输网络的角度，研究在一定供给和需求水平下网络具体弧段的流量，得到交通网络的具体状态[7-8]。刘杰等[9]以网络运营费用最小化为目标构建多商品网络流模型。Steadieseifi 等[10]和刘星材等[11]则以货流运输费用、扩建和新建费用最小化为目标。王伟等[12]，杨龙海等[13]综合量化了路径效用值以及货主和承运人运输选择倾向，构建了适用性更高的货流分配规划模型。但这些研究对不同品类货运需求特征差异性考虑较少。

交通运输绿色低碳的发展方向使得更多的学者投入到基于环境成本的货流路径选择模型研究中去。在公铁联运方面，货物运输全程可划分为公路运输、货流转移和铁路运输 3 个阶段[14-16]，并将碳排放量转化为相应的碳税成本[17-18]。Kelle 等[19]则构建了铁路、公路和水路 3 种方式并存的多式联运仿真模型，比较考虑环境成本与不考虑环境成本两种情形下运输方式运量的变化。

针对铁路运输而言，部分学者研究了运输参与者在温室气体排放、运输成本和运输时间等方面的利益平衡[20]。然而这些研究仅针对 CO_2 一种气体，并未考虑其他污染气体的环境成本，同时缺少在污染物排放系数和成本因子方面的探讨[21]。

本文从社会总成本的角度出发，将降低污染气体排放量这一目标转化为降低运输过程中的环境成本，定量研究环境成本系数不同取值下公铁两网货物运输变化情况，比较环境成本对运输方式和路径决策带来的变化，对于调整运输结构、控制大气污染、提升交通运输绿色发展水平具有重要意义。

1　陆路运输环境成本核算

运输环境成本是指运输活动造成环境污染而使环境服务功能质量下降的代价。运输过程产生的气体污染物主要有 SO_2、NO_x、PM_{10} 和 CO_2，环境成本可以通过各污染物的排放量和污染物成本因子的乘积来测算，计算公式如下

$$C_p=\sum_i RP_ic_i \tag{1}$$

式中：C_p 为环境污染成本；R 为能源消耗量；P_i 为能源燃烧产生第 i 类污染物的排放系数；c_i 为第 i 类污染物成本因子。

1）能源消耗量。根据《2019 年中国国家铁路集团有限公司统计公报》和《2019 年交通运输行业发展统计公报》，铁路单位运输工作量综合能耗 3.94 吨标准煤/百万换算吨公里，公路专业货运企业消耗 1.7 kg/100 t·km 标准煤。

2）污染物排放系数。污染物排放系数指燃烧单位数量的燃料或其他单位强度的行为过程排放到环境中的某种污染物的数量。污染物排放量计算按照我国火电行业通用计算标准，即工业锅炉每燃烧 1 t 标准煤产生 8.5 kg SO_2，7.4 kg NO_x，1 kg PM_{10} 和 2 620 kg CO_2。

3）污染物成本因子。污染物成本因子指各种污染物导致的个人健康损害、建筑物损害或农作物减产等环境质量实质性影响的经济价值，衡量的方法可以采用污染当量法进行计算，计算公式如下

$$c_i=\frac{Q_i}{W_i}k_i \tag{2}$$

式中：Q_i 为第 i 类污染物的排放量；W_i 为第 i 类污染物的污染当量值；k_i 为单位污染当量污染物的环境成本。根据《中华人民共和国环境保护税法》，SO_2、

NO_x 和 PM_{10} 污染当量值和环境成本取值见表1，CO_2 环境成本为50元/t。

表1 不同污染物污染当量及环境成本取值

Tab.1 Pollution equivalent and environmental cost of different pollutants

Pollutant	Pollution equivalent /kg	Environmental cost per unit equivalent/yuan
SO_2	0.95	6
NO_x	0.95	6
PM_{10}	2.18	1.2

2 货物单位时间价值确定

对于货物运输而言，价格和运输时间是货主关心的主要因素，货物运输效益函数构建如下

$$V_m^k=-(c_m^k+\theta(r_m)t_m^k) \tag{3}$$

式中：c_m^k 为第 m 股货流采用 k 运输方式的单位运输成本，$k\in A$，A 为所有运输方式的集合，$A=\{1,2\}$ 分别为公路运输、铁路运输；t_m^k 为每吨第 m 股货流采用 k 运输方式的时间；r_m 为第 m 股货流对应的货物品类；$\theta(r_m)$ 为该货物品类的单位时间价值，该价值反映货主对运输时间的支付意愿。

为了确定货物单位时间价值，可以基于公路和铁路运输方案的费用、时间消耗以及运量分担率，根据Logit模型来对参数进行标定，具体公式如下

$$\frac{p_{iju}^{\text{road}}}{p_{iju}^{\text{rail}}}=\frac{\exp(V_{iju}^{\text{road}})}{\exp(V_{iju}^{\text{rail}})}=\exp(V_{iju}^{\text{road}}-V_{iju}^{\text{rail}}) \tag{4}$$

将式(3)代入式(4)，并对等号两边取对数进行变换后有

$$\theta(u)=\frac{\ln\frac{p_{iju}^{\text{road}}}{p_{iju}^{\text{rail}}}+c_{iju}^{\text{road}}-c_{iju}^{\text{rail}}}{t_{ij}^{\text{road}}-t_{ij}^{\text{rail}}} \tag{5}$$

式中：p_{iju}^{road} 为从节点 i 到节点 j 的 u 品类货物的公路运输分担率；p_{iju}^{rail} 为从节点 i 到节点 j 的 u 品类货物的铁路运输分担率；c_{iju}^{road} 为使用公路从节点 i 到节点 j 每吨 u 品类货物的运费；c_{iju}^{rail} 为使用铁路从节点 i 到节点 j 每吨 j 品类货物的运费；t_{ij}^{road} 为使用公路从节点 i 到节点 j 运输时间；t_{ij}^{rail} 为使用铁路从节点 i 到节点 j 运输时间；$\theta(u)$ 为 u 品类货物的单位时间价值。

通过将多组不同OD货物的公铁运输分担率数据代入式(5)，采用多元线性回归即可得到各品类货物 $\theta(u)$ 的取值。

3 货物运输方式选择建模

3.1 问题描述和假设条件

利用图论知识，将陆路运输方式和路径选择组合优化问题抽象为网络 $G=[V,E,W]$，V 为网络中所有节点的集合，$V=\{1,2,3,\cdots\cdots,v\}$；$E$ 为网络中所有弧的集合；W 为弧权重集合，即弧段的距离。考虑环境成本的陆路运输方式和路径选择组合优化问题可以描述为：已知公路网和铁路网，将股已知货运量的货流从路网中的起点 O 运送到终点 D，运输过程中需要途径若干个节点。已知各种运输方式的单位运输费用、单位时间成本、运输时间、运输能力和污染物排放系数，并已知各种污染物的成本因子。在满足运输时限、运输能力限制等约束条件的前提下，确定每股货流在起终点间最佳的运输方式以及运输路径决策，使得所有货物的社会总成本之和最小。

假设条件如下：

1）同一股货流运输过程中不能分割；

2）任意两节点间公路和铁路的运输速度固定且已知，不考虑突发事件等不确定因素对运输时间的影响；

3）同一品类货物单位时间价值相同；

4）同一股货流只能选择一种运输方式。

3.2 模型建立

将运输费用、时间成本和环境成本分别记为 Z_1、Z_2 和 Z_3，则其计算公式可以分别表示如下

$$Z_1=\sum_{m\in N}\sum_{k\in A}\sum_{i,j\in V}F_mL_{ij}^kc_m^kx_{ijm}^k \tag{6}$$

$$Z_2=\sum_{m\in N}\theta(r_m)F_m\sum_{k\in A}\sum_{i,j\in V}\frac{L_{ij}^kx_{ijm}^k}{v^k} \tag{7}$$

$$Z_3=\sum_{m\in N}\sum_{k\in A}\sum_{i,j\in V}\sum_{s\in B}F_mL_{ijm}^kx_{ijm}^ke_k^sc_s \tag{8}$$

式中：F_m 为第 m 股货流的货运量，$m\in N$，N 为所有货流的集合，$N=\{1,2,3,\cdots,n\}$；c_m^k 为第 m 股货流采用 k 运输方式的单位运输成本，$k\in A$，A 为所有运

输方式的集合，$A=\{1,2\}$ 分别为公路运输、铁路运输；L_{ij}^{k} 为节点 i 和节点 j 之间采用 k 运输方式的运输距离，$i,j\in V$；v^{k} 为 k 运输方式的平均运输速度；e_{k}^{s} 为 k 运输方式 s 污染物排放系数，$s\in B$，B 为所有污染物的集合，$B=\{1,2,3,4\}$ 分别为 SO_2、NO_x、PM_{10} 和 CO_2；c_s 为 s 污染物成本因子；x_{ijm}^{k} 为决策变量，$x_{ijm}^{k}=1$ 为第 m 股货流在节点 i 和节点 j 之间采用 k 运输方式，否则 $x_{ijm}^{k}=0$。

为了考虑环境成本对货流运输方式选择的影响，即比较环境成本系数不同取值下公铁两网货流量的变化情况，将目标函数表示为 $\min Z=Z_1+Z_2+\alpha Z_3$，可以通过调整环境成本系数 α 的值改变环境成本的大小，$\alpha=0$ 即表示不考虑环境成本对货流分配的影响，$\alpha=1$ 即按照当前实际环境保护税征收标准下考虑环境成本对货流分配的影响。模型的约束条件具体如下

$$\sum_{j\in V}\sum_{k\in A}x_{ijm}^{k}\leqslant 1,\ \forall m\in N,\ \forall i\in V \tag{9}$$

$$\sum_{i\in V}\sum_{k\in A}x_{ijm}^{k}\leqslant 1,\ \forall m\in N,\ \forall i\in V \tag{10}$$

$$\sum_{i,j\in V}x_{ijm}^{1}\sum_{i,j\in V}x_{ijm}^{2}\leqslant 1,\ \forall m\in N \tag{11}$$

$$\sum_{k\in A}x_{ijm}^{k}\leqslant 1,\ \forall m\in N,\ \forall i,j\in V \tag{12}$$

$$\sum_{m\in N}F_m x_{ijm}^{k}\leqslant Q_{ij}^{k},\ \forall i,j\in V,\ \forall k\in A \tag{13}$$

$$\sum_{i,j\in V}\sum_{k\in A}\frac{L_{ij}^{k}x_{ijm}^{k}}{v^{k}}\leqslant T_m^{\max},\ \forall m\in N \tag{14}$$

$$x_{ijm}^{k}\in\{0,1\},\ \forall i,j\in V,\ \forall k\in A,\ \forall m\in N \tag{15}$$

式(9)和式(10)表示对于任意站点，每股货流最多只能经过一次；式(11)表示对于某一股货流，运输过程中不发生中转；式(12)表示对于某一股货流，其运输路径的任意两个相邻节点之间最多只能采用一种运输方式；式(13)表示任意两个相邻节点之间某一种运输方式所承载的运量不大于其运能限制，其中 Q_{ij}^{k} 表示节点 i 和节点 j 之间采用 k 运输方式的运输能力限制；式(14)表示每股货流运输时间不得超过其最大容许运到时间，其中 $T_m^{\max}$ 表示第 m 股货流的运到时限；式(15)为决策变量约束。

4　算例分析

4.1　算例描述

以山东省实际公路网和铁路网布局数据为原型，选取公路网中的高速公路和铁路网中的普速铁路，分别构建陆路运输系统中公路网和铁路网结构图，如图 1 和图 2 所示。图中弧两侧数字表示两点间距离。

所选案例共分为 224 支货流，总运量 145.649 2 万 t，货物品类分为 6 类，每支货流均有其最大容许运到时间。公路和铁路整车运输的单位成本计算公式如式(16)所示。其中，公路和铁路不同运价号货物的

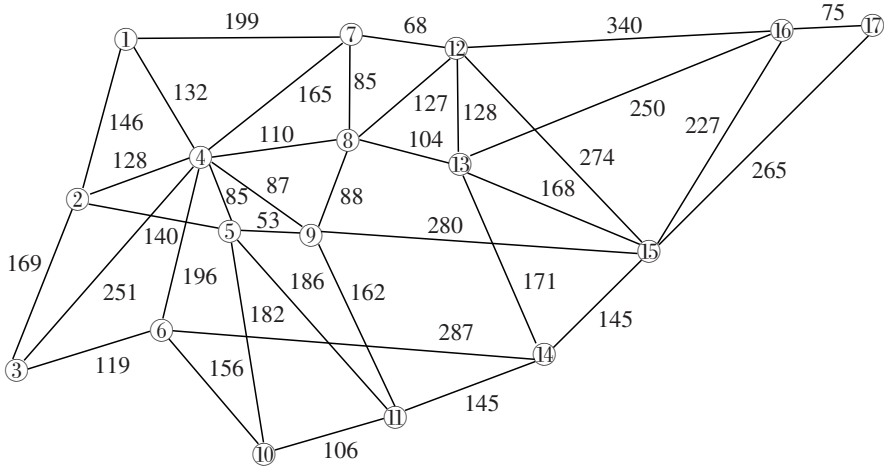


图 1　实例路网中的公路网结构图(单位：km)

Fig.1　Highway network structure diagram in the case(Unit：km)

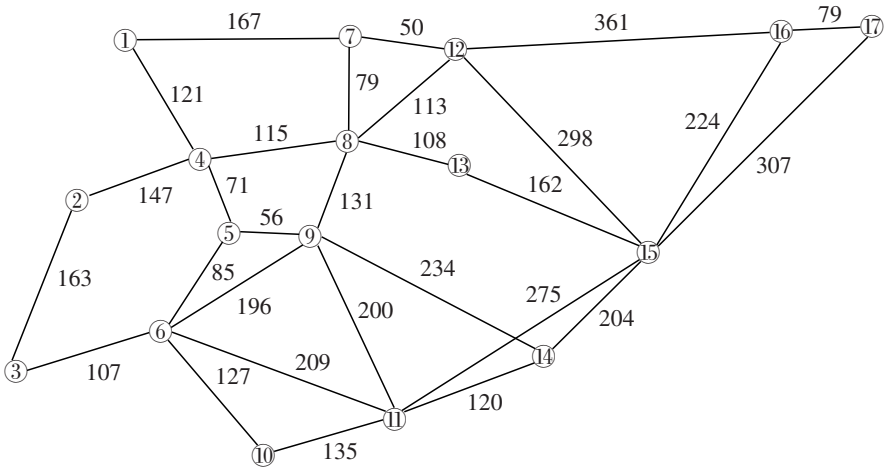


图2 实例路网中的铁路网结构图(单位:km)

Fig.2 Railway network structure diagram in the case(Unit:km)

c_1、c_2取值见表2。

表2 公路和铁路单位成本系数取值

Tab.2 Unit cost coefficient of highway and railway

Mode	Freight rate number	c_1/(yuan/t)	c_2/(yuan/(t·km))
Railway	1	9.5	0.086
	2	12.8	0.091
	3	16.3	0.098
	4	18.6	0.103
	5	26	0.138
	6	20	0.14
Road			0.302 4

$$c=\frac{c_1}{L}+c_2 \tag{16}$$

公路运输速度取70 km/h，铁路运输速度取33 km/h。根据济南局管内非平行运行图货车使用能力近似得到铁路网各区段运输能力,由于所分析的货物品类仅为大宗货物,对该能力做相应扣除;根据高速公路通行能力近似得到公路网的运输能力,同样也对该能力做相应扣除。

4.2 实例求解及结果分析

利用遗传算法进行求解，相关参数取值如下:种群大小为300,最大交叉概率为0.8,最小交叉概率为0.5，最大变异概率为0.05，最小变异概率为0.005,最大迭代次数设为3 000。

将不考虑环境成本的货流运输方式选择模型记为模型1,此时α=0,其目标函数为min $Z=Z_1+Z_2$。将考虑环境成本的货流运输方式选择模型记为模型2,此时α=1,其目标函数为min $Z=Z_1+Z_2+Z_3$。

1)公铁货运情况对比分析。通过对模型1和模型2得到的公路网和铁路网货运结果分析可知,公路网货运比重显著高于铁路网，其原因主要在于本文选用实例数据中较大比例的货物是相邻城市间短途货运需求,对于运输时间要求较高,而公路运输速度较快,公路运输货运周转量远高于铁路。模型1和模型2得到的公路网与铁路网具体货运情况见表3。

表3 货物运输方式选择情况

Tab.3 Selection of cargo transportation mode

Mode		Cargo flow quantity	Freight volume/($\times10^4$ t)	Turnover/($\times10^4$ t·km)
Model 1	Road	160	132.539 6	54 298.397 4
	Railway	64	13.109 6	3 778.316 5
Model 2	Road	154	125.955 1	52 537.560 1
	Railway	70	19.694 1	5 150.312 6

从表3可以看出,在考虑环境成本后,铁路承担的货流数量、货物运量及周转量均有一定程度的增加,其中公路货运周转量下降3.24%,铁路货运周转量上升36.31%,对运输结构起到一定的调整作用。

在公路货运比重显著高于铁路比重的背景下,当前环境成本占社会总成本比重较低,导致其对公转铁运输方式转移的影响有限。为了比较环境成本变化对于货流运输方式选择的影响,调整环境成本

系数的取值，提高环境成本在社会总成本的比重，从而得到公路与铁路货运周转量随环境成本系数变化的情况(图 3)。

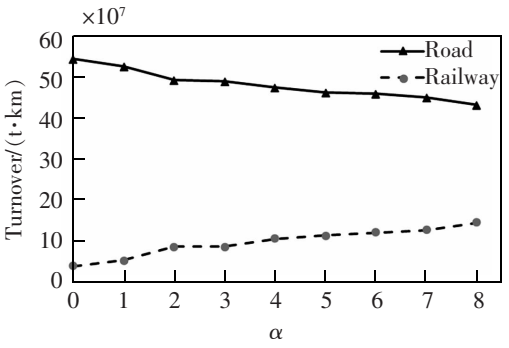


图 3　公路与铁路货运周转量变化情况

Fig.3　Changes in road and railway freight turnover

根据图 3 中曲线变化趋势可知,随着环境成本系数的增加,公路货运周转量不断下降,而铁路货运周转量则呈现增长趋势,公路运输相对于铁路运输竞争力开始减弱。这主要归功于铁路运输较公路运输在污染气体排放方面的优势。

模型 1 与模型 2 分品类的 224 支货流运输方式选择情况见表 4。计算结果显示,模型 2 与模型 1 相比,1、2、4、6 号品类部分货流由公路转移至铁路,运价率最低的 1、2 号品类货流转移效果更为显著。由于路段容量限制等原因,3、5 号品类部分货流由铁路转移至公路,以保证总成本的最低。可以看出,在公路货物运价率相同的情况下,铁路运价率越低的货物,其公转铁转移效果越显著。

表 4　分品类货流运输方式选择情况

Tab.4　Mode selection of freight flow by rate number

Model	Freight rate number	Road	Railway	Total
1	1	3	5	8
	2	39	12	51
	3	15	12	27
	4	68	19	87
	5	30	14	44
	6	5	2	7
	Total	160	64	224
2	1	2	6	8
	2	35	16	51
	3	19	8	27
	4	62	25	87
	5	32	12	44
	6	4	3	7
	Total	154	70	224

2) 成本对比分析。虽然与模型 1 最优解的目标函数值相比，模型 2 最优解的目标函数值增加了 0.46%,但这只是目标函数值的对比,无法反映实际社会总成本的变化。将模型 1 中各类污染气体折合为相应的环境成本,并纳入总成本中,具体各类成本情况见表 5。

表 5　模型 1 与模型 2 各类成本比较

Tab.5　Costs comparison between Model 1 and Model 2

×10^4 yuan

Cost	Mode	Model 1	Model 2
Transportation cost	Road	16 419.835	15 887.358
	Railway	630.573	899.884
	Total	17 050.408	16 787.242
Time cost	Road	7 220.364	6 995.521
	Railway	1 451.893	1 941.604
	Total	8 672.257	8 937.125
Equivalent environmental cost	Road	214.126	207.156
	Railway	3.454	4.701
	Total	217.580	211.858
Equivalent total cost		25 940.245	25 936.224

经统计分析,与模型 1 相比,模型 2 运输成本减少 1.54%,时间成本上升 3.05%,折合环境成本降低 2.63%,最终导致折合总成本有一定程度的降低,从模型 1 的 25 940.245 万元降低为 25 936.224 万元,降幅为 0.016%。即考虑环境成本能够降低社会总成本。但由于环境成本在社会总成本中占比较低,所以对运输结构调整影响较低。

3) 污染物排放对比分析。模型 1 与模型 2 各污染气体排放情况见表 6。

表 6　模型 1 与模型 2 污染气体排放情况

Tab.6　Pollutant gas emission of Model 1 and Model 2

t

Model	SO_2	NO_x	PM_{10}	CO_2
1	79.727	69.409	9.380	24 574.534
2	77.642	67.594	9.134	23 931.886

计算结果显示,模型2与模型1相比,SO_2,NO_x,PM_{10}和CO_2排放量分别降低2.615%、2.614%、2.623%和2.615%,即考虑环境成本的货流运输方式选择具有一定的减排效果。由于环境成本在社会总成本中占比较低,污染气体减排效果较微弱。

表7为不同环境成本系数取值下各类污染气体的排放量对比,随着环境成本系数α的提高,货主所需支付的环境费用不断增加,货流转移量逐渐加大,各类污染物排放量逐渐降低,产生一定减排效果。

表7 不同环境成本系数污染气体排放情况

Tab.7 Emission of pollutant gases with different environmental cost coefficients

t

α	SO_2	NO_x	PM_{10}	CO_2
0	79.727	69.409	9.380	24 574.534
1	78.055	67.953	9.183	24 059.175
2	73.956	64.385	8.701	22 795.843
3	73.629	64.101	8.662	22 695.107
4	72.013	62.694	8.472	22 197.040
5	70.384	61.276	8.280	21 694.856
6	70.380	61.272	8.280	21 693.708
7	69.084	60.144	8.128	21 294.243
8	67.200	58.503	7.906	20 713.344

5 结论

1)本文从社会总成本的角度出发,将降低污染物和温室气体排放量这一目标转化为降低运输过程中的环境成本,并据此对运输方式和路径选择组合优化模型的目标函数进行调整,运用运输方式和路径选择组合优化模型对这一转移量和影响进行了量化研究。最后以山东地区公路网和铁路网货运数据为原型,研究不同环境成本参数取值下的陆路运输方式和路径选择决策, 将理论应用到实际,验证了优化模型的合理性与求解算法的可行性。

2)通过对比可以发现,鉴于铁路运输在运输成本及环境成本方面的优势,随着环境成本系数的增加,部分货物会从公路转移至铁路运输,降低了整个运输系统的运输成本,各污染物的排放量都有一定程度的降低。同时较低的环境成本费用也导致了货流转移效果较为微弱。

3)未来,文中货主运输方式选择模型将在考虑运输费用、运输时间和环境影响因素外,进一步考虑运输安全、便捷性和货物自身价值等其他因素,同时基于货主个体的异质性开展不同影响因素对货主方式选择的敏感性分析,深入探讨多式联运体系下各类货物运输方式的市场占有率。

参考文献:

[1] WANG Y W,DING C,LIU C,et al. An analysis of interstate freight mode choice between truck and rail:A case study of Maryland,United States[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences,2013,96:1239-1249.

[2] 程文毅. 基于货物运到时限的货运方式选择模型研究[J]. 铁道货运,2017,35(9):16-19.
CHENG W Y. Study on freight transport modes selection model based on freight arrival time limit[J]. Railway Freight Transport,2017,35(9):16-19.

[3] 陈峰. 货物运输通道内运输方式分担率的研究[J]. 铁道运营技术,2012,18(3):24-27.
CHEN F. Study on the sharing rate of transportation modes in cargo transportation corridor[J]. Railway Operation Technology,2012,18(3):24-27.

[4] 罗俊. 基于行为分析的货物运输方式选择模型研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2012.
LUO J. Research on model of freight transportation mode choice based on behaviour analysis[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology,2012.

[5] CRISALLI U,COMI A,ROSATI L. A methodology for the assessment of rail-road freight transport policies[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences,2013,87:292-305.

[6] WANG X C,MENG Q. Discrete intermodal freight transportation network design with route choice behavior of intermodal operators[J]. Transportation Research Part B:Methodological,2017,95:76-104.

[7] 张琦,姜昊,魏玉光,等. 基于货物时间价值的中欧班列服务网络设计[J]. 铁道学报,2020,42(6):12-17.
ZHANG Q,JIANG H,WEI Y G,et al. Service network design of china railway express based on time value of goods[J]. Journal of the China Railway Society,2020,42(6):12-17.

[8] SZE J F,SALHI S,WASSAN N. A hybridisation of adaptive variable neighbourhood search and large neighbourhood search:application to the vehicle routing problem[J]. Expert Systems with Applications,2016,65:383-397.

[9] 刘杰,何世伟,宋瑞,等. 既有繁忙干线基于货运产品的流量分配模型及算法研究[J]. 铁道学报,2014,36(7):1-7.

LIU J，HE S W，SONG R，et al. Research on model and algorithm of flow assignment of busy truck railway lines based on freight products[J]. Journal of the China Railway Society，2014，36(7)：1–7.

[10] STEADIESEIFI M，DELLAERT N P，NUIJTEN W，et al. A metaheuristic for the multimodal network flow problem with product quality preservation and empty repositioning [J]. Transportation Research Part B：Methodological，2017，106：321–344.

[11] 刘星材，何世伟，孙杨，等. 基于云和声搜索的综合运输网络设计和货流分配优化[J]. 吉林大学学报(工学版)，2016，46(1)：108–113.
LIU X C，HE S W，SUN Y，et al. Comprehensive transportation mixed network design and freight flow allocation based on cloud harmony search algorithm[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)，2016，46(1)：108–113.

[12] 王伟，黄兴建. 区域铁路网货流分配方法研究[J]. 交通运输工程与信息学报，2017，15(1)：102–106.
WANG W，HUANG X J. Research of freight flow allocation method of regional railway network[J]. Journal of Transportation Engineering and Information，2017，15(1)：102–106.

[13] 杨龙海，安实，毛科俊. 基于非线性双层规划的货运网络分配模型[J]. 公路交通科技，2007，24(12)：109–112.
YANG L H，AN S，MAO K J. A freight network assignment model based on nonlinear bi–level programming[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development，2007，24(12)：109–112.

[14] 陈雷，林柏梁，王龙，等. 考虑碳排放的公铁两网之间货流转移[J]. 东南大学学报(自然科学版)，2015，45(5)：1002–1007.
CHEN L，LIN B L，WANG L，et al. Transfer of freight flow between highway and railway based on carbon emissions[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition)，2015，45(5)：1002–1007.

[15] 陈雷，林柏梁，温旭红，等. 低碳运输下陆路运输系统货流转移及流量分配综合优化[J]. 东南大学学报(自然科学版)，2016，46(3)：671–674.
CHEN L，LIN B L，WEN X H，et al. Integrated optimization of transfer of freight flow in land transportation system and transportation flow assignment based on low carbon emissions[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition)，2016，46(3)：671–674.

[16] 张振江，张玉召，王小荣. 模糊需求下快捷货物低碳运输方式及路径选择[J]. 铁道科学与工程学报，2021，18(3)：777–785.
ZHANG Z J，ZHANG Y Z，WANG X R. Low–carbon transportation mode and path selection of express freight under fuzzy demand condition[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2021，18(3)：777–785.

[17] 陈伟建. 考虑碳排放的公铁联运货流转移方案设计[D]. 北京：北京交通大学，2015.
CHEN W J. Scheme design on the transfer of freight flow for united transportation of railways and highways based on the carbon emissions[D]. Beijing：Beijing Jiaotong University，2015.

[18] 刘畅. 货物运输“公转铁”与铁路车流径路联合优化模型[J]. 铁道学报，2020，42(12)：18–27.
LIU C. Joint optimization model for diverting freight flow from road to railway and routing railway car flow[J]. Journal of the China Railway Society，2020，42(12)：18–27.

[19] KELLE P，SONG J，JIN M，et al. Evaluation of operational and environmental sustainability tradeoffs in multimodal freight transportation planning[J]. International Journal of Production Economics，2019，209：411–420.

[20] RUDI A，FRÖHLING M，ZIMMER K，et al. Freight transportation planning considering carbon emissions and in–transit holding costs：A capacitated multi–commodity network flow model[J]. EURO Journal on Transportation and Logistics，2016，5(2)：123–160.

[21] 于雪峤，周凌云，席江月，等. “公转铁”形势下铁路大宗货物运输市场分担率提升策略研究[J]. 铁道经济研究，2021(2)：31–36.
YU X Q，ZHOU L Y，XI J Y，et al. Research on the strategy of improving the market share of railway transportation products under the situation of "highway to railway" [J]. Railway Economics Research，2021(2)：31–36.



第一作者：叶玉玲(1971—)，女，教授，博士，博导，研究方向为轨道交通运输规划、设计与管理研究；1993 年本科毕业于西南交通大学，1996 年硕士毕业于上海铁道大学，2005 年博士毕业于同济大学交通运输工程学院。E–mail：yyling71@163.com。

(责任编辑：吴海燕　姜红贵)